

**ผลกระทบของการใช้ทะลายปาล์มเปล่าเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น
ต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง**
**Impact of Empty Fruit Bunch (EFB) Using as Fuel in a Grate Fired Combustor on
Heat Exchange of a Superheater Steam Tube**

ธานิดย์ เมธียนนท์^{1*} สรวุฒิ สังวรกาญจน์² ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์³ สุขสวัสดิ์ คงกล้า⁴ และสุวิทย์ เตีย⁵

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

⁵ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400

*ติดต่อ : โทร (662) 9883655 ต่อ 3106, 3107

E-mail: thanid_m@yahoo.com^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อที่จำลองสภาวะเหมือนกับท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องมาจากการเกาะตัวของผิวท่อของอนุภาคจากการเผาไหม้ทะลายปาล์มเปล่าในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น โดยควบคุมอุณหภูมิเหนือเบดที่ 800°C และ 950°C ในการศึกษาผลกระทบของการเกาะตัวของอนุภาคที่มีต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นได้ทำการติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนสองชั้นซึ่งใช้น้ำและอากาศเป็นตัวกลางรับความร้อนโดยจะแขวนอยู่บนโหลดเซลล์เพื่อวัดอัตราการเกาะตัวของอนุภาคบนผิวท่อ นอกจากนี้ อุณหภูมิผิวท่อจะถูกควบคุมไว้ที่ประมาณ 400 - 500°C โดยการปรับอัตราการไหลของน้ำและอากาศให้เหมาะสม ในขณะที่อุณหภูมิแก๊สไอเสียที่ไหลผ่านท่อมี่ค่าประมาณ 600-850°C ผลการทดลองพบว่า อนุภาคเริ่มเกาะตัวบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนหลังจากเริ่มทดลองได้เพียง 2 ชั่วโมง โดยตลอดช่วงการทดลองประมาณ 20 ชั่วโมง พบว่าความหนาของชั้นอนุภาคที่เกาะตัวมีค่าประมาณ 3-5 mm. ซึ่งคิดเป็นฟลักซ์ของการเกาะตัว (Deposit Flux) ได้ในช่วง 167-175 g/m²-h ส่วนความสามารถในการรับความร้อนที่ท่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งลดลงเหลือประมาณ 70-80% ซึ่งคิดเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ด้านแก๊สเผาไหม้) ที่ลดลงเหลือประมาณ 50-56% นอกจากนี้ พบว่าการเกาะตัวของอนุภาคที่ผิวท่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดมากในทิศทางที่สัมผัสโดยตรงกับการไหลของแก๊สไอเสีย

คำหลัก: การเกาะตัว/ ชีวมวล/ เตาเผาไหม้แบบตะกรับ/ ทะลายปาล์มเปล่า

Abstract

This research encompassed studying heat exchange ability of a probe simulated as a superheater steam tube in boilers that might be exacerbated by deposition on the probe surface. The probe is double pipe comprising water and air tubes and is hung by two load cells to determine deposition rate. Temperature over the bed was regulated at 800 and 950°C resulting in the corresponding gas temperature of 600-850°C, while the temperature of probe surface was modified at 400-500°C by modulating mass flow of water and air. The results demonstrated that deposition took place after just 2 hrs from the start and its growth continued throughout the investigating period of 20 hrs. At the end of testing period, deposit

thickness was measured as 3-5 mm consistent with the deposit heat flux of 167-175 g/m².h. Predictably, the heat uptake of the probe hinged much on the accumulating deposit. As deposit somewhat matured, the heat uptake dropped to 70-80% compared to the maximum value. Meanwhile, the heat transfer coefficient (gas side) plummeted to 50-56%. In addition, the particles entrained in the flue gas preferentially deposited on the upstream side of the probe.

Keywords: Biomass/ Deposition/ Empty Fruit Bunch/ Grate fried combustor

1. บทนำ

ปัจจุบันรัฐบาลได้ส่งเสริมให้มีการใช้ชีวมวลเพิ่มมากขึ้นเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล จำพวกน้ำมันดีเซล น้ำมันเตา หรือถ่านหินที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีแนวโน้มของราคาที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปใช้นั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบเช่น การเผาไหม้โดยตรง หรือ การผลิตเป็นไบโอแก๊ส และไบโอดีเซล แต่ส่วนใหญ่มักนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงเพราะสะดวกและมีประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรในประเทศไทยนั้น มีหลากหลายชนิดได้แก่ แกลบ ชี้เลี้ยง ฟางข้าว ทะลายปาล์ม ชังข้าวโพด ฯลฯ อย่างไรก็ตามชีวมวลที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ไม่ได้มีศักยภาพในการใช้งานเท่าเทียมกันทุกชนิด เพราะอาจมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณที่เหลือในแต่ละฤดูกาล ในขณะที่ทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunch; EFB) ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวผลปาล์มน้ำมันซึ่งมีปริมาณมากในภาคใต้ของประเทศ (920,230 ตันต่อปี [1]) ซึ่งมีโรงงานอุตสาหกรรมทางภาคใต้บางแห่งนำทะลายปาล์มมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น แต่ก็เกิดปัญหาสิ่งสกปรกเกาะชุดทำไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ทำให้ต้องหยุดซ่อมบำรุงบ่อยครั้งซึ่งนอกเหนือจากแผนงานที่ตั้งไว้ ซึ่งปัญหาเหล่านี้เกิดจากสารประกอบบางส่วนเป็น Potassium (K) Chlorine (Cl) และ Sulfur (S) [2] ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อยู่ในรูปของสารระเหย มักจะก่อให้เกิดปัญหาการเกาะตัวที่ชุดอุปกรณ์ผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งมีงานวิจัยต่างประเทศทำการศึกษาโดยการได้ติดตั้ง air-cooled probe เพื่อศึกษาการ

เกาะตัวที่เกิดขึ้นในบริเวณท่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง [2-5]

ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาไหม้ (อุณหภูมิเหนือเบด) ที่ส่งผลกระทบต่อ การแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องมาจากการเกาะตัวบนผิวท่อของอนุภาคจากการเผาไหม้ทะลายปาล์มเปล่าในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น

2. วัตถุประสงค์ในการทดลองและการทดลอง

2.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองคือทะลายปาล์มเปล่า ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม และนำมาผ่านกระบวนการสับมีความยาวประมาณ 3-5 cm ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

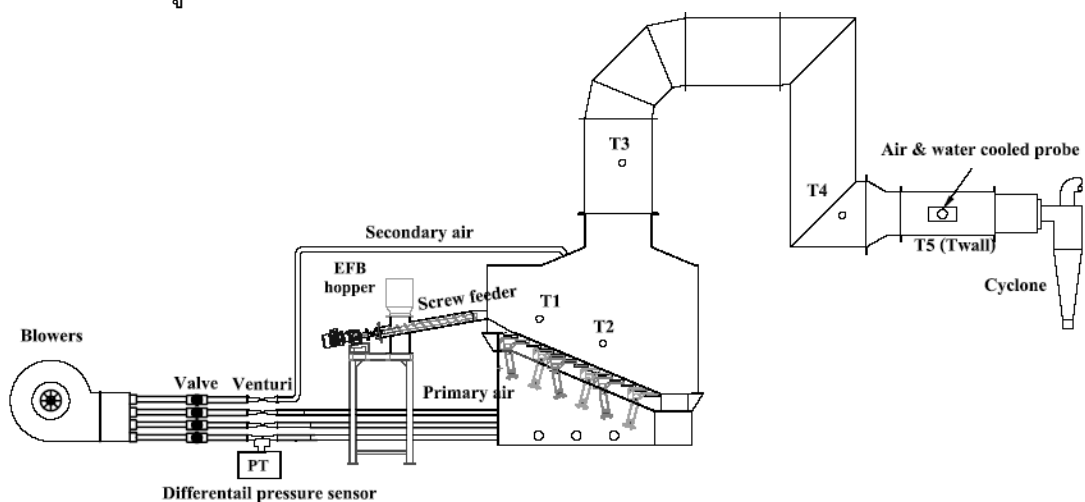
ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

องค์ประกอบในเชื้อเพลิง	ปริมาณโดยน้ำหนัก
	เปียก (%) ละลายปาล์ม
Carbon	22.86
Hydrogen	3.02
Oxygen	29.41
Nitrogen	0.18
Sulphur	0.65
Moisture	38.38
Ash	51.5
Higher heating value (MJ/kg)	9.10

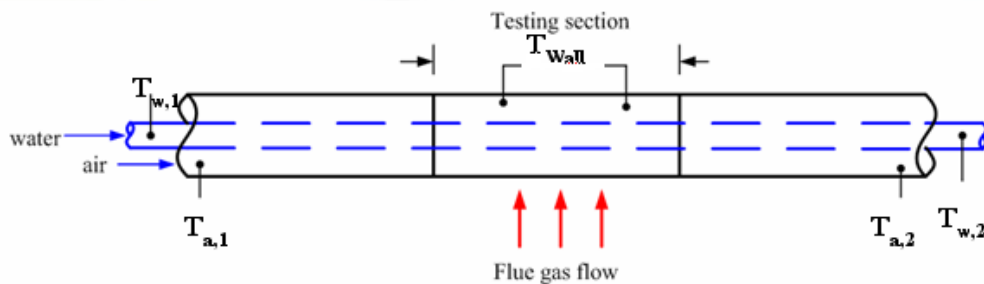
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น เตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นมีขนาด กว้าง×ยาว×สูง ประมาณ 1.15×2.35×4.40 เมตร โดยมีลักษณะเป็นแบบชั้นบันได ซึ่งมีบันไดจำนวนทั้งหมด 13 ชั้นและมีใบกวาดจำนวน 12 ชุด อยู่ระหว่างชั้นบันไดแต่ละชั้น ซึ่งใบกวาดจะทำหน้าที่กวาดเชื้อเพลิงละลายปาล์มให้ตกไปยังบันไดชั้นถัดไปซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า สำหรับ

การป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาไหม้จะใช้สกรูลำเลียงจำนวน 2 ชุด ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงโดยใช้อินเวอร์เตอร์ การจ่ายอากาศแบ่งอากาศเป็น 2 ส่วน อากาศส่วนที่ 1 (Primary air) เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงบนบันได ซึ่งจะทำการแบ่งเป็น 3 ท่อ เพื่อให้จะให้ลักษณะการกระจายอากาศ เต็มพื้นที่หน้าตัดของบันไดและใบกวาด โดยอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางช่องระหว่างบันไดและใบกวาด และอากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) เป็นอากาศที่เข้าไปช่วยเผาไหม้สารระเหยที่ออกจากเชื้อเพลิง ซึ่งการทำการจ่ายอากาศส่วนที่ 2 เข้าทางหลังคาห้องเผาไหม้ ส่วนซีถ้าที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกลำเลียงออกโดยใช้สกรูลำเลียง นอกจากนี้แก๊สลอยที่ติดมากับแก๊สเผาไหม้นั้นจะถูกดักโดยใช้ไซโคลน ในการวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ ได้ใช้เซนเซอร์ที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่าง (differential pressure transmitter) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของย่านการวัด เป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ ส่วนการวัดอุณหภูมิในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด $\pm 1\%$ ซึ่งทำการวัด 5 ตำแหน่ง



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น



รูปที่ 3 ลักษณะของ air & water cooled probe

ในการศึกษาถึงความสามารถในการรับความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเกิดการเกาะตัวบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheater) ในหม้อไอน้ำเมื่อใช้ทะเลยาปาล์มสดเป็นเชื้อเพลิง โดยการจำลองชุดท่อรับความร้อนด้วยอากาศร่วมกับน้ำ (air & water Cooled probe) ซึ่งเป็นแบบท่อซ้อน 2 ชั้น (double pipe) ดังรูปที่ 3 โดยอากาศจะไหลในท่อชั้นนอก (ขนาด 25 มิลลิเมตร) ส่วนน้ำจะไหลในท่อชั้นในขนาด (16 มิลลิเมตร) ทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิผิวท่อ (T_{wall}) อยู่ในช่วง $400-500^{\circ}\text{C}$ สำหรับท่อที่ใช้เป็นท่อไอน้ำ Sch40 ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกับท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งในหม้อไอน้ำทั่วไป การทำงานของ probe แก๊สไอเสียไหลผ่าน probe ก็จะถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศและน้ำที่ไหลอยู่ภายใน สำหรับการควบคุมอุณหภูมิผิว probe จะทำโดยการควบคุมอัตราการไหลอากาศและน้ำโดยใช้วาล์วและ อุปกรณ์ วัดอัตราการไหลด้วยโรตاميเตอร์ (Rotameter) อย่งไรก็ตาม เพื่อให้สามารถบันทึกการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น จะทำการวัดอุณหภูมิทางเข้า-ออก ของอากาศและน้ำด้วย PT100 ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการสมดุลพลังงานดังสมการ (1) และ (2) และทำการติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ probe อันเนื่องมาจาก การเกาะตัวบน probe

ขั้นตอนการทดลองปรับปริมาณอากาศส่วนต่าง ๆ ดังตาราง จากนั้นทำการจุดเตาเผาไหม้ โดยจะเริ่มใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงเพื่ออุ่นเตาให้อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ $800-900^{\circ}\text{C}$ แล้วเริ่มป้อนทะเลยาปาล์มสู่

ห้องเผาไหม้ซึ่งทำการปรับอัตราการป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ เมื่อสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60 นาที จากนั้นทำการติดตั้ง probe การควบคุมอัตราการไหลอากาศและน้ำโดยใช้วาล์วและวัดอัตราการไหลด้วยโรตاميเตอร์ (Rotameter) แล้วเริ่มวัดค่าต่างๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆของเตาเผาไหม้และอุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำและอากาศพร้อมทั้งน้ำหนัก probe เพื่อนำไปคำนวณหาความสามารถในการรับความร้อน (Heat uptake) ดังสมการที่ 3 และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมด้านนอก (gas side overall heat transfer coefficient) ดังสมการที่ 4 สมการที่ใช้ในการคำนวณความสามารถการรับความร้อน

$$Q_{th} = Q_w + Q_a \quad (1)$$

$$Q_{th} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) + \dot{m}_a c_{p,a} (T_{a,out} - T_{a,in}) \quad (2)$$

ความสามารถการรับความร้อนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ %

$$Relative\ heat\ uptake(\%) = \left[\frac{Q_t}{Q_{Max}} \right] \times 100\% \quad (3)$$

Q_{th} = อัตราการรับความร้อนรวม

Q_a = อัตราการรับความร้อนของอากาศ

Q_w = อัตราการรับความร้อนของน้ำ

Q_t = อัตราการรับความร้อนรวมที่เวลาใดๆ

Q_{Max} = อัตราการรับความร้อนรวมสูงสุด

\dot{m}_a, \dot{m}_w = อัตราการไหลของน้ำและอากาศ

$c_{p,a}, c_{p,w}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำและอากาศ

สมการที่ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมด้านนอก

$$h_{o,overall} = \frac{Q_{th}}{A_o(T_g - T_{wall})} \quad (4)$$

$h_{o,overall}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมด้านนอก

A_o = พื้นที่การรับความร้อนด้านนอก = $\pi D_o L$

T_g = อุณหภูมิแก๊สเสียด้านหน้า Probe

\bar{T}_{wall} = อุณหภูมิเฉลี่ยผิว Probe

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางนอกท่อ

L = ความยาวท่อส่วนปะทะแก๊สเสีย

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง	อุณหภูมิเหนือเบด	
	อุณหภูมิต่ำ	อุณหภูมิสูง
อุณหภูมิเหนือเบด °C	800	950
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)	20	33
สัดส่วนอากาศส่วนที่ 1 (Primary air)	0.7	0.7
สัดส่วนอากาศส่วนที่ 2 (Secondary air)	0.3	0.3
ปริมาณอากาศส่วนเกิน %	207	55

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

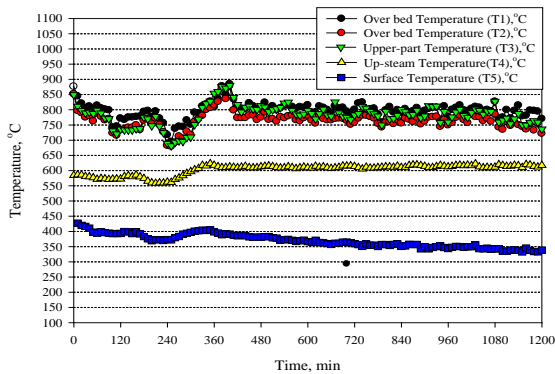
จากการศึกษา ผลกระทบ ของการเผาไหม้ ทะลายปาล์มเปล่าในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขึ้น ซึ่งได้พิจารณาพฤติกรรมของการเผาไหม้ด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ส่วนผลกระทบ ต่อท่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พิจารณาจากความสามารถการรับความร้อนและน้ำหนักลักษณะทางกายภาพของอนุภาคที่เกาะ air & water Cooled probe ภายใต้เงื่อนไขต่างๆเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง 20 ชั่วโมง ได้แสดงผลการทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขึ้น

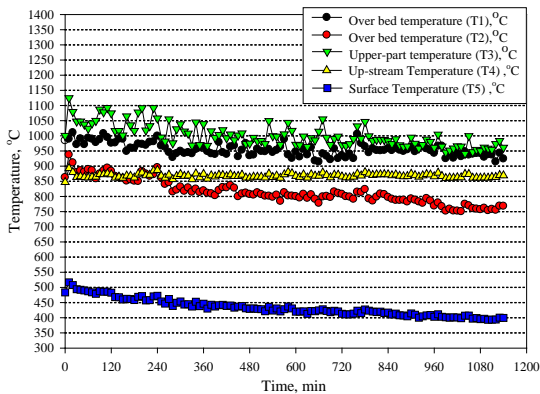
ในการเผาไหม้ทะลายปาล์มเปล่าในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขึ้นสังเกตได้ว่าเชื้อเพลิงที่เคลื่อนที่

ภายในห้องเผาไหม้โดยการผลึกของบันไดมีลักษณะสานกันเป็นก้อน เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของทะลายปาล์มเป็นเส้นใย ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันทั้งสองเงื่อนไข รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ (ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ แสดงรูปที่2) การเผาไหม้เงื่อนไขอุณหภูมิต่ำรูปที่ 4(ก) (อุณหภูมิเหนือเบด 800°C) สังเกตได้ว่าอุณหภูมิเหนือเบด T1 T2 มีค่าใกล้เคียงกันมีค่าอยู่ในช่วง 750-800°C ซึ่งการเผาไหม้ส่วนนี้เป็นการเผาไหม้สารระเหยและคาร์บอนเสถียรที่อยู่ในเชื้อเพลิง ซึ่งปริมาณอากาศส่วนที่ 1 มากพอที่จะทำให้การเผาไหม้สารระเหยและคาร์บอนเสถียรในเชื้อเพลิงได้สมบูรณ์ (ปริมาณอากาศส่วนเกิน 207%) ส่งผลให้สารระเหยที่เหลือไปเผาไหม้ต่อกับอากาศส่วนที่ 2 เหนือห้องเผาไหม้มีปริมาณน้อย สังเกตได้จากอุณหภูมิแก๊สไอเสีย T3 มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเหนือเบด ส่วนการเผาไหม้ที่เงื่อนไขอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิเหนือเบด 950°C) พบว่าตำแหน่งการเผาไหม้เหนือเบดตำแหน่ง T1 อุณหภูมิสูงมีค่าประมาณ 950°C คาดว่าปริมาณความร้อนในห้องเผาไหม้มีค่าสูงเมื่อเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการเผาไหม้คาร์บอนเสถียรอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้คาร์บอนที่เหลือไปเผาไหม้ต่อที่ตำแหน่ง T2 น้อยลง ทำให้อุณหภูมิตำแหน่งนี้ลดลงเหลือประมาณ 800°C จากการพิจารณาอุณหภูมิแก๊สไอเสีย T3 พบว่าอุณหภูมิต่ำตำแหน่งนี้สูงสุดมีค่าประมาณ 1000°C นั้นเกิดจากการเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้สารระเหยที่ออกมาจากเชื้อเพลิงอย่างรวดเร็วและปริมาณอากาศ (ปริมาณอากาศส่วนเกิน 55%) ไม่พอที่จะใช้ในการเผาไหม้สารระเหยเหนือเบดได้หมด สารระเหยที่เหลือจะไปเผาไหม้ต่อกับอากาศส่วนที่สองส่งผลให้อุณหภูมิแก๊สไอเสียสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงการลดลงของอุณหภูมิแก๊สไอเสียที่ตำแหน่ง T3 ถึง T4 นั้นเกิดจากการสูญเสียความร้อนผ่านผนังปล่องไอเสีย อุณหภูมิ T4 ทั้งสองเงื่อนไขมีค่าเท่ากับ 606°C และ 868°C ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิแก๊สไอเสียด้านหน้ากับ air & water cooled probe (มีค่าใกล้เคียง

กับอุณหภูมิแก๊สไอเสียด้านหน้าอุปกรณ์ผลิตไอน้ำร้อน
ยวดยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรม [2,3]



(ก) อุณหภูมิเหนือเบดต่ำ (800°C)



(ข) อุณหภูมิเหนือเบดสูง (950°C)



(ค) ถ้ำที่เกิดการหลอม

รูปที่ 4 การกระจายอุณหภูมิตำแหน่งต่าง ๆ

นอกจากนี้ จากการสังเกตลักษณะของถ้ำ
หนักพบว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิสูง มีถ้ำบางส่วนเกิดการ
หลอมและเกาะกันเป็นก้อน คาดว่าเกิดจากการหลอม
ของธาตุประกอบ K [3] ที่เกิดจากการเผาไหม้ทะเลาะ
ปาล์ม แสดงในรูปที่ 4(ค) ซึ่งมีปริมาณถ้ำหลอม
ประมาณ 35% ของถ้ำทั้งหมด แต่ที่เงื่อนไขอุณหภูมิต่ำ
ไม่มีถ้ำหลอม

4.2 ลักษณะการเกาะตัวที่ probe

จากรูปที่ 4 แสดงถึงลักษณะทางกายภาพของ
การเกาะตัว (Deposition) ของอนุภาคที่ผิว probe ที่
ติดตั้งในเตาเผาใหม่ จากการควบคุมอัตราการไหล
ของน้ำและอากาศที่เข้าสู่อุปกรณ์อุณหภูมิผิว probe
เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 420°C ที่เงื่อนไขอุณหภูมิต่ำ จากรูป
ที่ 5(ก) พบว่าลักษณะการเกาะ สามารถแบ่งออกเป็น
2 ชั้นหลักๆคือ ชั้นที่ติดกับผิว probe ซึ่งเป็นชั้นฟิล์มสี
ขาวบางๆ คาดว่าเกิดจาก สารประกอบ K, Cl, S ที่
ออกมาจากเชื้อเพลิงที่เกิดจากการเผาไหม้ ที่อยู่ในรูป
ของแก๊สไหลมากับแก๊สไอเสีย [2,3] มาควบแน่นที่ผิว
ของ probe ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งเป็นลักษณะยาง
เหนียว และชั้นถัดมาจะเป็นลักษณะเป็นเม็ดอนุภาคที่
ไหลมากับแก๊สไอเสีย มาเกาะกับผิวเหนียวของชั้น
แรก ส่วนใหญ่จะเกาะอยู่ด้านหน้า probe ซึ่งเป็นด้าน
ที่ปะทะกับแก๊สไอเสียปกคลุมพื้นที่ผิว probe ประมาณ
70 %ของพื้นที่ผิวทั้งหมดเป็นชั้นหนาประมาณ
3 – 5 mm จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพ คาด
ว่าอนุภาคที่เกาะ เป็นอนุภาคของถ้ำลอยที่เกิดจาก
การเผาไหม้ในเบดลอยมากับแก๊สไอเสียมาเกาะกับชั้น
ผิวเหนียวที่เกิดจากการควบแน่นของสารประกอบ K,
Cl, S เป็นลักษณะคล้ายฟองน้ำจับตัวกันแบบหลวมๆ
ทำความสะอาดออกง่าย และที่เงื่อนไขอุณหภูมิสูงจาก
รูปที่ 5(ข) ความคุมอุณหภูมิผิว probe 480°C ยังต่ำ
กว่าอุณหภูมิควบแน่นของสารประกอบ K, Cl, S
(อุณหภูมิควบแน่น 550°C) ลักษณะ ชั้นอนุภาคเป็น
สองชั้นคล้ายกับเงื่อนไขอุณหภูมิต่ำแต่ที่แตกต่างกัน
อย่างชัดเจนก็คืออนุภาคชั้นนอกจับตัวกันเป็นชั้นแข็ง
ทำความสะอาดออกยากนั้นคาดว่าเกิดจากการมี
สารประกอบ K บางส่วนมีการหลอมรวมกับอนุภาค
บนผิว probe เนื่องจากอุณหภูมิของแก๊สไอเสียที่
ปะทะอนุภาคที่เกาะมีอุณหภูมิที่สูง 868°C (จุด
หลอมเหลวของสารประกอบ K, Cl, S 600-700°C)



(ก) อุณหภูมิเหนือเบต 800°C



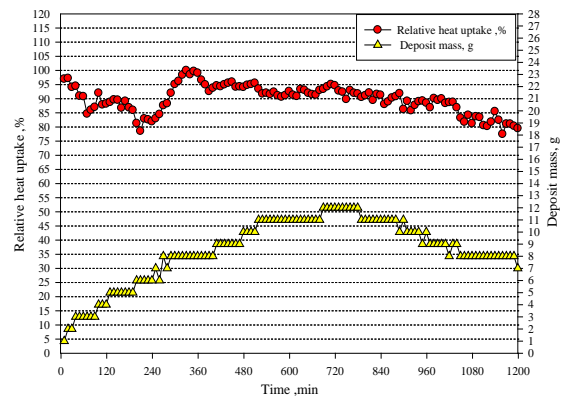
(ข) อุณหภูมิเหนือเบต 950°C

รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของการเกาะ

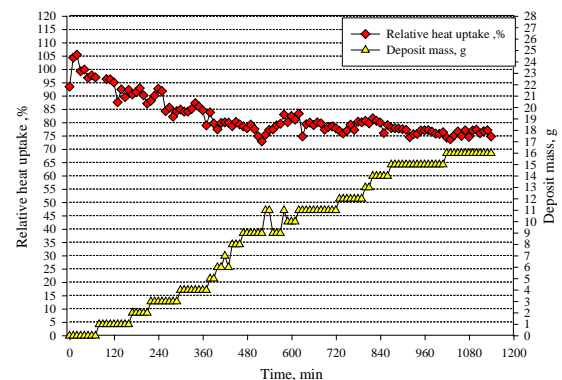
4.3 ความสามารถการรับความร้อนของ probe

ในการติดตั้งชุดอุปกรณ์ air & water cooled probe เพื่อศึกษาผลกระทบของการเกาะตัวของอนุภาคจากการศึกษาความสามารถในการรับความร้อนและมวลของอนุภาคที่เกาะ แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งคำนวณหาความสามารถในการรับความร้อน จากปริมาณความร้อนรวมของน้ำและอากาศดังสมการที่ 1 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับความสามารถรับ ความร้อนสูงสุดดังสมการ ที่ 2 จากรูปที่ 6(ก) ที่เงื่อนไข อุณหภูมิเหนือเบตต่ำ 800°C ความสามารถในการรับ ความร้อนไม่สม่ำเสมอ ในช่วงแรก เนื่องจากอุณหภูมิ ภายในห้องเผาไหม้ยังไม่คงที่ (รูปที่ 4(ก)) เมื่อทำการ ทดลองประมาณ 4 ชั่วโมง สังเกตได้ว่าความสามารถ ในการรับความร้อนจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ น้ำหนักอนุภาคที่เกาะที่ผิว probe เนื่องจากชั้นของ อนุภาคที่เกาะเป็นชั้นฉนวนกั้นความร้อนที่แก๊สไอเสีย ถ่ายเทไปยังผิว probe ซึ่งน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่ม การทดลองถึงเวลาประมาณ 15 ชั่วโมง คิดอัตราการ เกาะตัว (Deposit flux) เท่ากับ 175 g/m².h และ หลังจากนั้นน้ำหนัก เริ่มลดลง คาดว่ามีมวลบางส่วน หล่น เนื่องจากลักษณะการเกาะแบบหลวมๆ

(รูปที่ 4(ก)) ทำให้อนุภาคบริเวณด้านหน้าหล่น เมื่อ สังเกตพบว่าความสามารถในการรับความร้อนยัง คง ลดลงอย่างต่อเนื่อง นั้นคาดว่ายังมีอนุภาคบางส่วนที่ ยังเกาะปกคลุมบริเวณผิวด้านข้างอุปกรณ์ เพิ่ม ทำให้ พื้นที่การรับความร้อน ลดลงส่งผลให้ความสามารถใน การรับความร้อนลดลง ไปด้วย แต่น้ำหนักของอนุภาค ยังลดลง คาด ว่าอนุภาค ที่หล่น มีปริมาณมากกว่า อนุภาคที่เกาะเพิ่ม ใช้เวลาในการทดลองประมาณ 20 ชั่วโมงความสามารถในการรับความร้อนเหลือ ประมาณ 80 % ส่วนเงื่อนไขอุณหภูมิเหนือเบตสูง 980°C แสดงในรูปที่ 6(ข) พบว่า เริ่มมีมวลเกาะที่ probe หลังจากทดลองประมาณ 2 ชั่วโมง และมีการ สะสมเพิ่มขึ้น



(ก) อุณหภูมิเหนือเบตต่ำ (800°C)



(ข) อุณหภูมิเหนือเบตสูง (950°C)

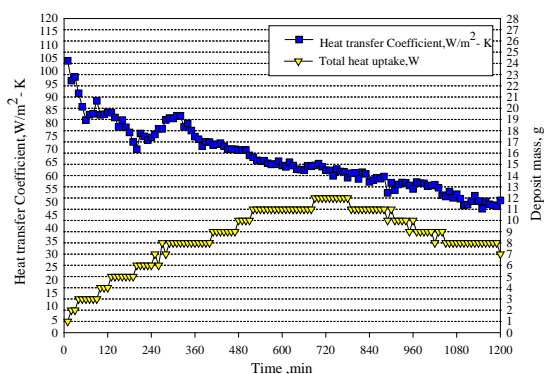
รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความสามารถการรับ ความร้อนและน้ำหนัก probe

ซึ่งส่งผลให้ ความสามารถในการรับความร้อน probe ลดลงตามน้ำหนักอนุภาคที่เพิ่มขึ้นคล้ายกับเงื่อนไข อุณหภูมิต่ำ ในการทดลองนี้อนุภาคจับตัวกันแน่นทำ

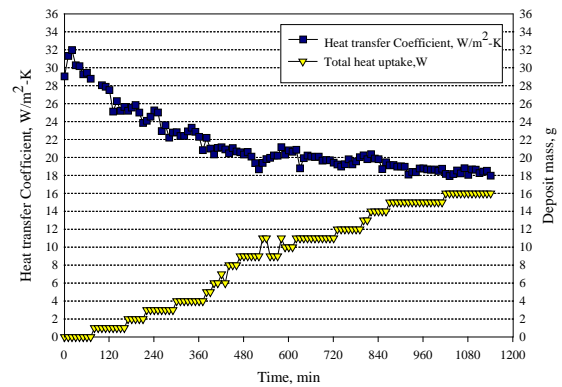
ให้ไม่มีการหล่น ของอนุภาค (รูปที่ 5(ข)) ใช้เวลาในการทดลอง 20 ชั่วโมง ความสามารถในการรับความร้อนลดลงเหลือประมาณ 70 % อัตราการเกาะตัวเท่ากับ $167 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ ซึ่งใกล้เคียงกันทั้ง 2 เงื่อนไข

4.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ probe

จากการพิจารณาถึงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมด้านนอก (gas side heat transfer coefficient) ของ air & water cooled probe จากรูปที่ 7 พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงตามน้ำหนักของอนุภาคที่เกาะตัว คล้ายกับการลดลงของความสามารถในการรับความร้อน สังเกตได้ จากการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิผิวอุปกรณ์ตำแหน่ง T5 (รูปที่ 5(ก)) เงื่อนไขอุณหภูมิเหนือเบตต่ำ อุณหภูมิผิวเริ่มต้น 420°C ลดลงเหลือ 300°C เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ในขณะที่อุณหภูมิแก๊สไอเสียด้านหน้า probe T4 คงที่ ซึ่งทำให้ผลต่างของอุณหภูมิแก๊สไอเสียกับอุณหภูมิผิว probe เพิ่มขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงด้วยเช่นกัน ทั้งเงื่อนไขอุณหภูมิเหนือเบต 800°C กับ 950°C มีลักษณะที่คล้าย คลึงกัน ใช้เวลาในการทดลองประมาณ 20 ชั่วโมง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงเหลือประมาณ 50 % และ 56% ตามลำดับ



(ก) อุณหภูมิเหนือเบตต่ำ (800°C)



(ข) อุณหภูมิเหนือเบตสูง (950°C)

รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและน้ำหนัก probe

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษา ผลกระทบ ของการเผาไหม้ ทะลายปาล์มเปล่าในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้น ต่อ การแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ผลิตไอน้ำร้อน ยวดยิ่ง ที่เงื่อนไขการเผาไหม้อุณหภูมิเหนือเบต 800°C และ 950°C สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเผาไหม้เชื้อเพลิงทะลายปาล์มเปล่าในเตาเผาไหม้ได้เกิดขึ้นบริเวณเหนือบันไดอุณหภูมิเหนือเบตอยู่ในช่วง $800\text{--}950^\circ\text{C}$ สารระเหยบางส่วนจะเผาไหม้กับอากาศส่วนที่ 2 เหนือห้องเผาไหม้ซึ่งเห็นได้จากอุณหภูมิแก๊สไอเสียที่เพิ่มขึ้นที่เงื่อนไขอุณหภูมิเหนือเบตสูง และมีถ้าบางส่วนเกิดการหลอมและเกาะตัวเป็นก้อน
2. การเกาะตัวของอนุภาค เกิดขึ้นมากในทิศทางที่สัมผัสโดยตรงกับการไหลของแก๊สไอเสียมีความหนาประมาณ 3-5 mm. ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเหนือเบตต่ำการเกาะเป็นลักษณะหลวมคล้ายฟองน้ำ แต่ที่อุณหภูมิสูงอนุภาคเกาะเป็นชั้นแข็งทำความสะอาดยาก
3. การเกาะของอนุภาคคิดเป็นฟลักซ์ของการเกาะตัว (Deposit Flux) ได้ในช่วง $167\text{--}175 \text{ g/m}^2\text{-h}$ ส่วนความสามารถในการรับความร้อนของ probe ลดลงเหลือประมาณ 70-80% ซึ่งคิดเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ลดลงเหลือประมาณ 50-56% ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของอนุภาค

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนวิจัย และบริษัทชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทะเลลายปาล์มเปล่าที่ใช้เป็นวัสดุในงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Agricultural Economics ; 2543-2545
- [2] Frandsen, F., Hansen, J., Jensen, P., Dam-Johansen, K., Horlyck, S. and Karlsson, A., 2003, "Ash and deposit formation in the biomass co-fired Masnedo combined heat and power production plant", IFRF combustion journal, Article number 200304, PP. 1-17.
- [3] Michelsen H.P., Frandsen, F., Dam-Johansen, K., Larsen, O.H., 1998, "Deposition and high temperature corrosion in a 10 MW straw fired boiler", Fuel processing technology, Vol. 54, PP. 95-108.
- [4] Zbogar, A., Jensen, P., Frandsen, F., Hansen, J., Glarbprg, P., 2006, "Experimental investigation of ash deposit shedding in a straw-fired boiler", Energy&Fuel, Vol. 20, PP.512-519.
- [5] Thsis, M., Skrifvars B-J., Hupa, M. and Tran H., 2006, "Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1: Deposition rate", Fuel, Vol. 85, PP. 1125-1130.